

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.1.11

УДК 621.74

А.А. Шумков, Т.Р. Абляз, Е.В. Матыгуллина, П.Н. КилинаПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**ЭФФЕКТ ИСКАЖЕНИЯ ФОРМЫ RP-МОДЕЛЕЙ
В ПРОЦЕССЕ ПОСЛОЙНОГО НАРАЩИВАНИЯ
И ПОСТОБРАБОТКИ СИНТЕЗИРУЕМОГО МАТЕРИАЛА**

Точность объектов, полученных с использованием технологии стереолитографии, зависит от степени отверждения в процессе изготовления и постобработки. Наличие объемов с различными степенями отверждения в изготовленном объекте приводит к непропорциональной усадке, что является результатом возникновения внутренних напряжений и причиной искажения формы. Искаженная форма и остаточные напряжения могут ограничить область применения технологий быстрого прототипирования в производстве точных деталей. Целью данной работы является исследование эффектов искажения формы образцов из фотополимерного материала SI500, построенных по технологии масочной стереолитографии в зависимости от методики постобработки и конструктивных особенностей SLA-прототипа. Для оценки искажения формы смоделированы и изготовлены прототипы с монолитной, полый и ячеистой структурами в виде внутреннего несущего каркаса. Экспериментально подобран режим послойного синтеза фотополимерного материала SI500. Методика измерения искажения формы в отвержденном состоянии заключается в измерении отклонений поверхности образцов по точкам и последующем анализе. В результате исследований установлено, что различные методы постобработки и конструктивные особенности моделей влияют на результаты искажения формы и свидетельствуют о неоднородности SLA-прототипов. Исполнение образца в виде оболочки с внутренней пористостью оказывает положительное влияние на компенсацию внутренних напряжений, возникающих при усадке материала в процессе постобработки, и снижает эффект искажения формы образца. Полученные результаты позволяют прогнозировать степень отверждения SLA-прототипов с различными конструктивными исполнениями и оценить эффект искажения формы образца при различных методах постобработки.

Ключевые слова: масочная стереолитография, степень отверждения, методы постобработки, фотополимер, полимеризация, усадка, внутренние напряжения, ячеистая структура, точность, быстрое прототипирование.

A.A. Shumkov, T.R. Abliaz, E.V. Matygullina, P.N. Kilina

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**THE EFFECT OF DISTORTION OF RP-MODELS
IN THE PROCESS OF BUILDING AND LAYERING
POST-PROCESSING OF THE SYNTHESIZED MATERIAL**

Accuracy objects produced using stereolithography technology depends on the extent of cure during the manufacture and post-processing. Presence volumes with different degrees of cure in the fabricated object leads to a disproportionate shrinkage as a result of internal stresses and cause distortions.

tion shape. The distorted shape and residual stresses can limit the scope of the rapid prototyping technologies in the production of precision parts. The purpose of this work is to study the effects of distortion of the samples from the photopolymer material SI500, built on the technology of stereolithography mask, depending on the post-processing techniques and design features of the SLA-prototype. To evaluate the distortion modeled and fabricated prototypes with a monolithic, hollow and cellular structure in the form of internal supporting framework. Experimentally chosen mode of synthesis of layered photopolymer material SI500. Methods of measuring the distortion in the cured state is to measure variations on the surface of the sample points and following analysis. The studies found that various postprocessing techniques and design features of the model affect the results of distortion of the evidence and the heterogeneity of the SLA-prototypes. Execution of the sample in the form of a shell with an internal porosity has a positive effect on the compensation of internal stresses generated during the shrinkage of the material during post-processing, and reduces the effect of distortion of the sample. The results allow to predict the degree of cure SLA-prototypes of various design and evaluate the effect of distortion of the sample at various post-processing techniques.

Keywords: mask stereolithography, degree of cure, methods of post-processing, photopolymer, polymerization, shrinkage, internal stress, cellular structure, accuracy, rapid prototyping.

В настоящее время для сокращения цикла производства опытных изделий и образцов широко применяются технологии быстрого прототипирования (RP – rapid prototyping). При этом весьма эффективной является технология стереолитографии (SLA), основанная на использовании ультрафиолетового излучения лазерного луча или маски изображения, способных послойно отверждать жидкий фотополимерный материал. Материал представляет из себя жидкую смолу на основе мономеров и фотоинициаторов, которые активируются под действием УФ-излучения. Переход его из жидкого состояния в твердое помогает построить объект по компьютерным 3D-данным [1, 2]. Основной задачей SLA-технологии является получение полностью отвержденной части объекта после сканирования лазерным лучом или маской УФ-излучения. В основном в качестве материала построения используется фотополимерная смола на основе эпоксидных и акриловых мономеров, испытывающих усадку при переходе из жидкого состояния в твердое при воздействии на них УФ-излучения. Это приводит к напряжениям в структуре прототипа, а затем к деформациям и искажениям формы после послойного наращивания фотополимерного материала.

Степень отверждения объекта после воздействия УФ-излучения в конце процесса наращивания материала достигает 50–80 %. Постобработка, которая заключается в дополнительной засветке в УФ-камере, увеличивает степень отверждения до 90 % [3]. Неполная полимеризация фотополимерного материала в процессе построения модели увеличивает усадку во время операции постобработки в УФ-камере или в тепловой камере. Для сохранения точности моделей необходимо све-

сти к минимуму изменение объема неотвержденных областей модели. В процессе полимеризации усадка может достигать 8 % от объема. Основная часть усадки происходит в процессе отверждения жидкого фотополимерного материала, и лишь небольшая часть наблюдается во время постобработки. Наличие различных степеней отверждения в построенной модели приводит к непропорциональной усадке, что является результатом наличия внутренних напряжений, причиной искажения формы и низкой прочности модели [4, 5]. В настоящее время проведены различные исследования, направленные на повышение точности и снижение эффектов коробления формы, связанных с усадкой используемого материала. Salmogia и др., представили результаты исследования влияния параметров построения на степень отверждения SLA-образцов и методов постобработки на напряжения, возникающие при усадке фотополимерного материала. По результатам работы определено, что тепловая постобработка минимизирует искажение образцов. Weissman и др. провели исследования, направленные на сокращение времени полимеризации SLA-моделей, снижение степени усадки, коробления и размерных погрешностей за счет снижения мощности лазера в процессе построения объектов по SLA-технологии. Эффективными направлениями совершенствования данной технологии является также разработка смол быстрого отверждения в процессе сканирования поверхности слоя и выбор скорости сканирования [6].

Raju и др. предлагают оптимизировать параметры процесса с помощью метода Тагучи [7]. В исследовании делается попытка анализа параметров процесса, таких как толщина засвечиваемого слоя, ориентация прототипа в рабочей области построения и ширина сканирования, которые влияют на прочность SLA-прототипов. В результате исследования определены оптимальные сочетания параметров процесса построения SLA-прототипов.

Одной из основных проблем при послойном изготовлении прототипов является низкое качество поверхности, связанное с «эффектом лестницы». В работе Zhou и др. рассматривается альтернативный подход для достижения гладких поверхностей в SLA-процессах на основе проекции маски изображения слоя [8]. Объектом исследования авторов является мениск жидкости, связанный с параметрами процесса. На основании результатов исследования разработан метод равновесного мениска для изготовления гладких поверхностей. Emami и др. представили

исследования, направленные на применимость метода построения SLA-моделей на основе стереолитографии [9]. Результаты исследований показывают применимость метода построения синтезированных моделей из фотополимерных материалов, основанного на масочной стереолитографии (PSL). По результатам измерений установлена повторяемость построенных образцов, в том числе и сложных пространственных форм без применения поддерживающих устройств, как в SLA-процессе. Максимальные отклонения размеров не превышают 32 мкм, что является преимуществом в изготовлении точных прототипов деталей по CAD-моделям [10]. Kang и др. ввели новую модель затвердевания и провели сравнение с экспериментальными результатами [11]. Для прогнозирования толщины затвердевшей структуры Розен и др. определили модель на основе экспериментальных результатов PSL-технологий [12]. Ikuta и др. разработали новую модель для сканирования на основе технологии SLA, основанную на концепции постепенного процесса затвердевания при использовании распределения интенсивности облучения УФ-излучением [13]. Zhou и др. были введены новые методы улучшения результатов изготовления SLA-прототипов путем оптимизации отдельного пикселя серой шкалы интенсивности освещения изображений [14]. Chiou и др. рассмотрели новое применение динамических масок для манипуляций клеток [15]. Модель затвердевания на основе пикселя, разработанная в данном исследовании, применяется в улучшении SLA-технологии. Искаженная форма и остаточные напряжения могут ограничить область применения технологий быстрого прототипирования в производстве точных деталей. Эти эффекты обусловлены преобразованием материалов в процессе производства. Если последующий слой сформирован и сплавлен на уже существующую структуру, потенциальные объемные изменения материала в процессе обработки приводят к появлению внутреннего напряжения и искажению формы. Явление, которое приводит к искажению формы в стереолитографии, является усадкой при полимеризации и временным тепловым нагреванием смолы во время фотоинициирования процесса отвердевания.

Целью данной работы является исследование эффектов искажения формы образцов из фотополимерного материала, построенных по технологии масочной стереолитографии в зависимости от методики постобработки и конструктивных особенностей SLA-прототипа.

В работе проведено экспериментальное измерение эффектов искажения формы фотополимерных прототипов, изготовленных по технологии стереолитографии, в зависимости от методов постобработки и конструктивных особенностей.

В качестве технологии для построения образцов использован один из видов процесса стереолитографии, основанный на послойном масочном синтезировании фотополимерного акрилового материала SI500. Схема работы и общий вид стереолитографической установки представлены на рис. 1.

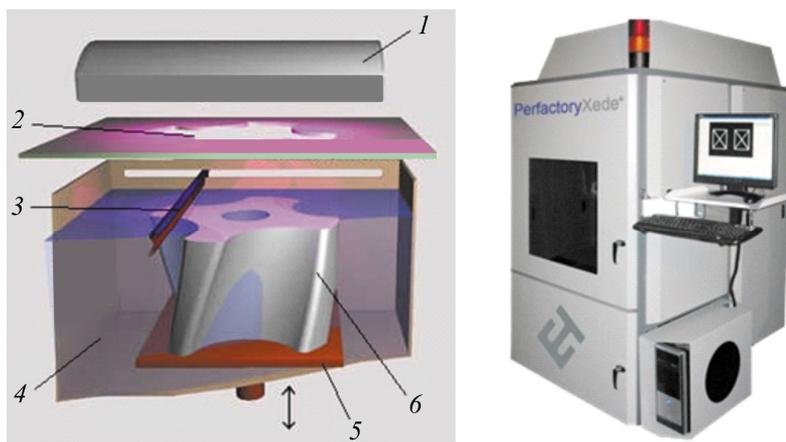


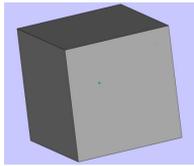
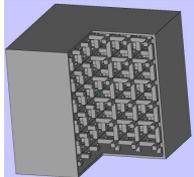
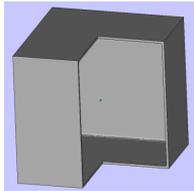
Рис. 1. Схема работы и общий вид стереолитографической машины:
1 – источник УФ-излучения; 2 – фотомаска; 3 – разглаживающий ролик;
4 – ванна с жидким фотополимером; 5 – платформа; 6 – модель

3D-модель прототипа ориентируется в рабочем пространстве и рассекается на 2D-слои. По мере засветки слоя каждого сечения модели 2, платформа 5 опускается на заданную величину следующего слоя. Ролик 3 разглаживает материал нового слоя, и происходит процесс отверждения с помощью создания маски изображения с УФ-излучением. Операция повторяется до полного выращивания прототипа [16].

Для проведения эксперимента по измерению искажения формы образцов из фотополимерного материала смоделированы девять образцов (таблица).

Для изготовления образцов на установке стереолитографии EnvisionTec Perfactory Xede использован режим обработки, представленный ниже.

Характеристики экспериментальных образцов

Номер образца	Структура	Кол-во, шт.	Размеры	Вид
1	Монолитная	3	30 × 30 × 30 мм	
2	Ячеистая	3	30 × 30 × 30 мм; – толщина стенки 0,5 мм; – размер ячеек 5 × 5 × 5 мм; – толщина перемычки ячеек 1 мм	
3	Полая	3	30 × 30 × 30 мм; толщина стенки 0,5 мм	

Параметры процесса построения на стереолитографической установке EnvisionTec Perfactory Xede

Толщина слоя, мкм	Толщина поддержек, мкм	Высота поддержек, мм	Время засветки сечений прототипа, мс	Время засветки поддержек, мс
50	280	3	8500	8500

Для анализа искажения формы после отверждения образцов применены три метода постобработки:

1. Отверждение в УФ-камере UVACUBE (2000 W) в течение 15 мин;
2. Отверждение в спиртовой ванне в течение 24 ч;
3. Отверждение при искусственном освещении дневных ламп в течении 24 ч.

Экспериментальное определение искажения формы после постобработки образцов с различной конструкцией осуществлялось на трехкоординатной измерительной машине Carl Zeiss CONTURA G2 АКТИВ. Методика эксперимента заключалась в измерении отклонений поверхности образцов после различных методов постобработки [17]. Для срав-

нения данных искажения формы осуществлялся сбор 10 точек по линиям двух вертикальных и верхней горизонтальной плоскостей. Схема измерений и сбора точек представлена на рис. 2.

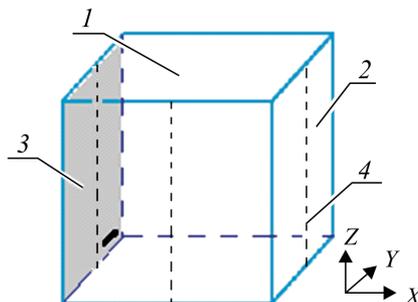


Рис. 2. Схема измерений и сбора точек:
1 – верхняя горизонтальная поверхность; 2, 3 – вертикальная поверхность; 4 – линия сбора точек отклонения поверхности

Данные экспериментальных исследований по искажению формы образцов после постобработки тремя методами представляют набор точек, каждая из которых характеризуется координатами x , y , z . Обработка результатов и их анализ выполнялся графическим методом с помощью построения графиков искажения поверхностей по двум координатам: y , z – перемещение контактного щупа; x , z – отклонение.

Результаты измерений искажения формы для поверхностей 1–3 после постобработки в УФ-камере представлены на рис. 3–5.

Результаты измерений искажения формы для поверхностей 1–3 после постобработки дневными лампами представлены на рис. 6–8.

Результаты измерений искажения формы для поверхностей 1–3 после постобработки в спиртовой ванне представлены на рис. 9–11.

При анализе данных графиков (см. рис. 3–11) видно, что различные способы постобработки характеризуются различными количественными характеристиками искажений, однако сопровождаются общими качественными явлениями. Ярко выраженное искажение поверхности образцов наблюдается на верхней поверхности, что обусловлено наличием внутренних напряжений, возникающих при усадке материала (см. рис. 3, 6, 9). Достаточно ровные боковые вертикальные поверхности образцов в случае постобработки в спиртовой ванне можно охарактеризовать неполной полимеризацией всего объема материала, так как на материал, отверждаемый под действием света, оказывалось минимальное воздействие света в спиртовой ванне (см. рис. 9–11).

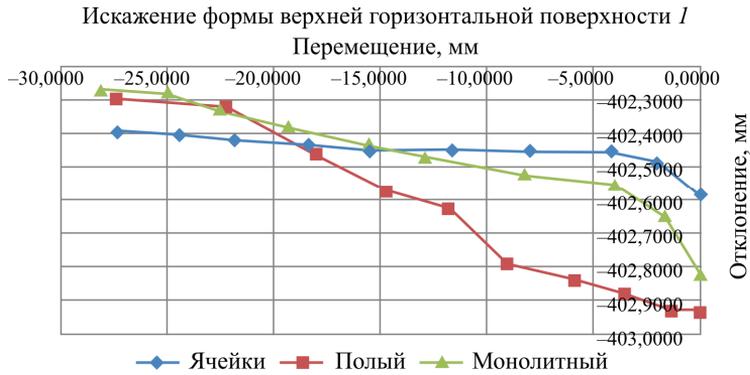


Рис. 3. Результаты измерений искажения формы верхней горизонтальной поверхности 1 образцов после постобработки в УФ-камере

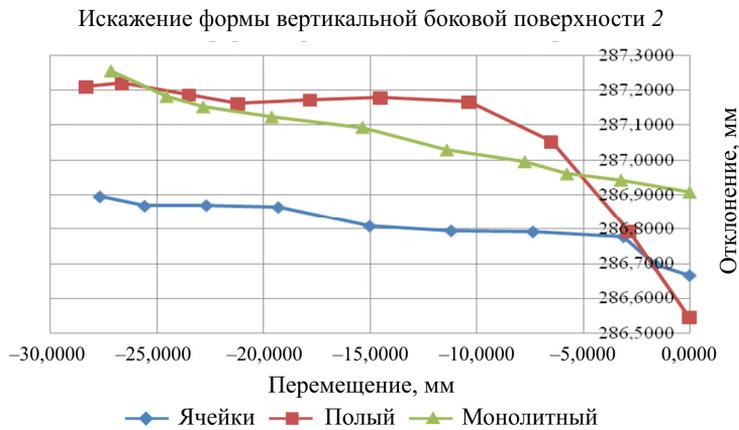


Рис. 4. Результаты измерений искажения формы вертикальной боковой поверхности 2 образцов после постобработки в УФ-камере

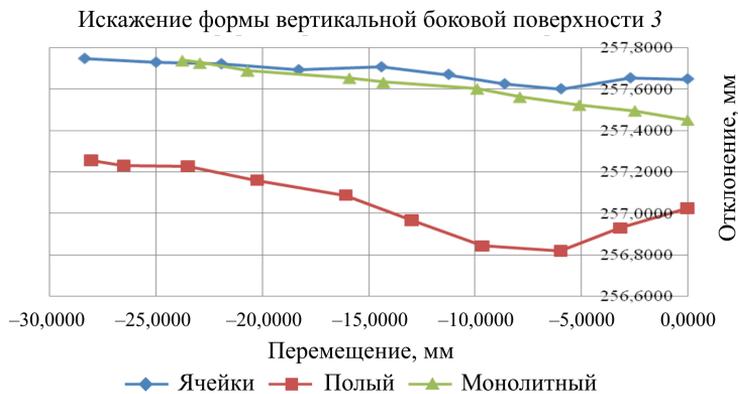


Рис. 5. Результаты измерения искажения формы вертикальной боковой поверхности 3 образцов после постобработки в УФ-камере

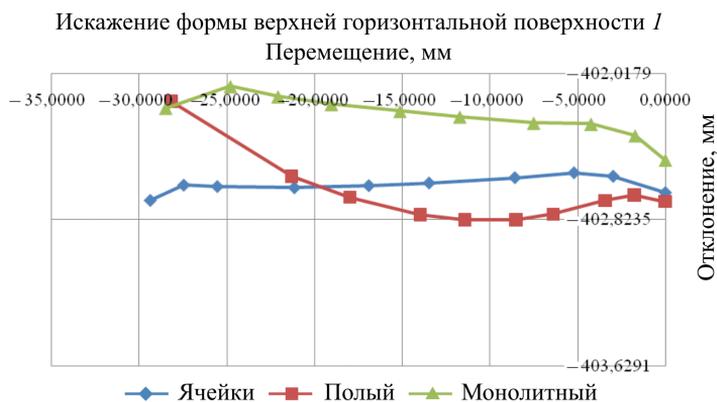


Рис. 6. Результаты измерений искажения формы верхней горизонтальной поверхности 1 образцов после постобработки дневными лампами

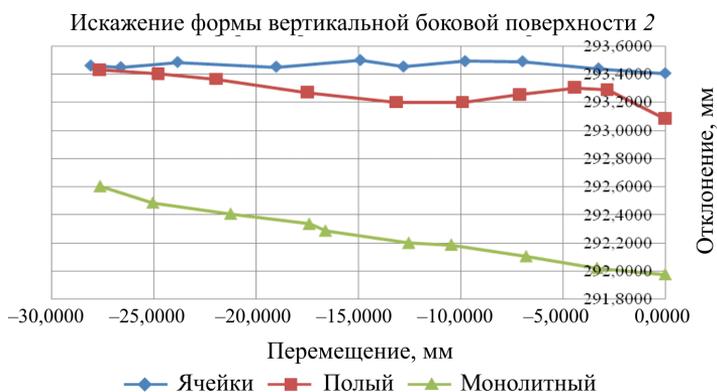


Рис. 7. Результаты измерений искажения формы вертикальной боковой поверхности 2 образцов после постобработки дневными лампами

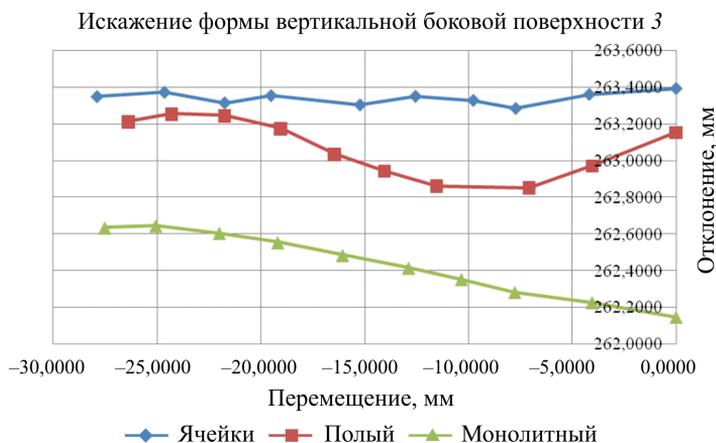


Рис. 8. Результаты измерения искажения формы вертикальной боковой поверхности 3 образцов после постобработки дневными лампами

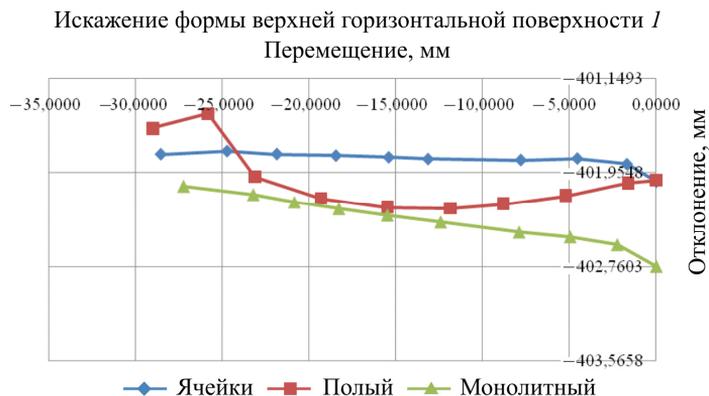


Рис. 9. Результаты измерений искажения формы верхней горизонтальной поверхности 1 образцов после постобработки в спиртовой ванне

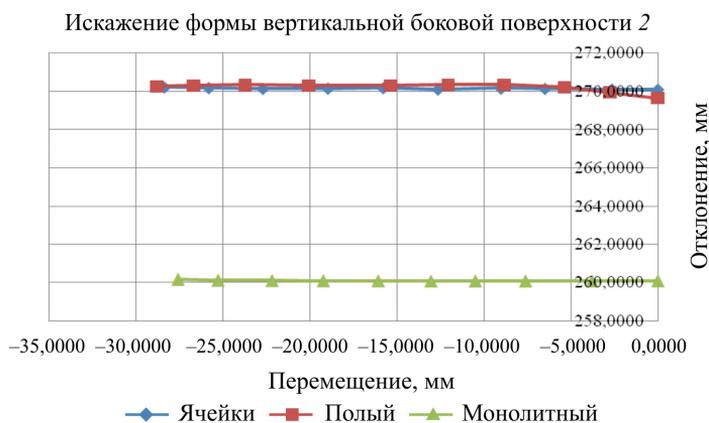


Рис. 10. Результаты измерений искажения формы вертикальной боковой поверхности 2 образцов после постобработки в спиртовой ванне

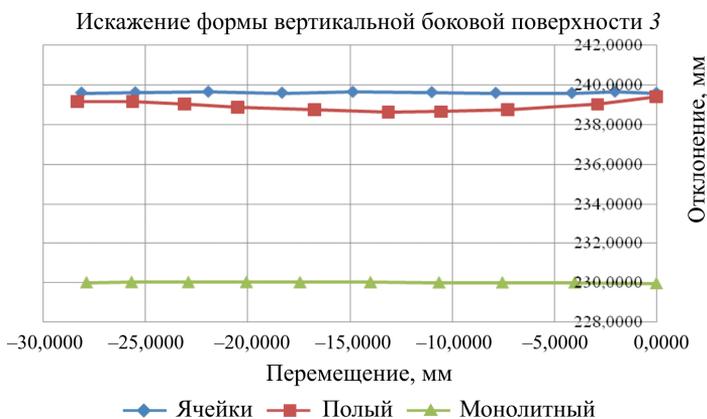


Рис. 11. Результаты измерений искажения формы вертикальной боковой поверхности 3 образцов после постобработки в спиртовой ванне

Экспериментальное измерение искажения формы образцов после проведения операции постобработки дает представление о неоднородности SLA-прототипов. Было установлено, что использование различных конструктивных исполнений образцов и методов постобработки влияет на результаты искажения формы. Использование внутренней регулируемой пористости значительно снижает внутренние напряжения, возникающие при усадке материала в процессе постобработки (рис. 3–11). Результаты, полученные в данной работе, позволят повысить точность SLA-прототипов и предсказать их поведение при различных конструктивных исполнениях и методах постобработки.

Список литературы

1. Jacobs P.F. Rapid Prototyping and Manufacturing, Fundamentals of Stereolithography // Society of Manufacturing Engineers. – Dearborn, 1992. – P. 369.
2. Jacobs P.F. Stereolithography & Others RP & M Technologies: From Rapid Tooling. – Dearborn: Booknews Inc., 1996. – 384 p.
3. Bernhard P., Hoffmann M., Hunziker M. Advanced Testing of Stereolithography Resins // 2nd International Conference on Rapid Prototyping. The University of Dayton, June 23–26, 1991.
4. Curing characteristics of acrylic photopolymer used in stereolithography process / J.Y.H. Fuh, L. Lu, C.C. Tan, Z.X. Shen, S. Chew // Rapid Prototyping Journal. – 1999. – Vol. 5, № 1. – P. 27–34.
5. Dusel K.-H., Eschl J., Wiedemann B. Improvement or part accuracy-investigations into the basics of photopolymerisation // Proceedings of the 5th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, June 4–6. – Helsinki, 1996.
6. Real time measurements of linear shrinkage during laser photopolymerization: implications concerning post cure shrinkage / P.T. Weissman, R.P. Chartoff, S.J. Rodrigues, S.-M. Linden // Proc. 4th Int. Conf. Rapid Prototyping, June 14–17. – Dayton, 1993.
7. Establishment of Process model for rapid prototyping technique (Stereolithography) to enhance the part quality by Taguchi method / B.S. Raju, U.C. Shekar, K. Venkateswarlu, D.N. Drakashayani // Procedia Technology. – 2014. – № 14. – P. 380–389.
8. Zhou C., Chen Y., Waltz R.A. Optimized mask image projection for solid freeform fabrication // I. Manuf: Sci. Eng. – 2009. – № 131(6). – P. 061003–061003-8. DOI: 10.1115/1.4000334

9. Emami M.M., Barazandeh F., Yaghmaie F. Scanning-projection based stereolithography: method and structure // *Sensors and Actuators*. – 2014. – Vol. A 218. – P. 116–124.

10. Emami M.M., Barazandeh F., Yaghmaie F. An analytical model for scanning-projection based stereolithography // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2015. – № 219. – P. 17–27.

11. Hyun-Wook Kang, Jeong Hun Park, Dong-Woo Cho. A pixel based solidification model for projection based stereolithography technology // *Sensors and Actuators*. – 2012. – Vol. A 178. – P. 223–229.

12. Limaye A., Rosen D.W. Process planning to build mask projection stereolithography parts with accurate vertical dimensions // *Proceedings of the 17th Solid Freeform Fabrication Symposium*. – Austin, 2007. – P. 159–173.

13. Ikuta K., Hirowatari K., Ogata T. Three dimensional micro integrated fluid systems (MIFS) fabricated by stereo lithography // *Proceedings of the IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'94)*. – 1994. – P. 1–6.

14. Digital material fabrication using mask-image-projecton-based stereolithography / C. Zhou, Y. Chen, Z. Yang, B. Khoshnevis // *Rapid Prototyping Journal*. – 2013. – Vol. 19, iss. 3. – P. 153–165.

15. Chiou P.Y., Ohta A.T., Wu M.C. Massively parallel manipulation of single cells and microparticles using optical images // *Nat. Lett.* – 2005. – Vol. 436. – P. 370–372.

16. Шумков А.А. Создание мастер-моделей послойным синтезом фотополимера [Электронный ресурс] // *Современные проблемы науки и образования*. – 2015. – № 2 (58). – URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=20538> (дата обращения: 20.01.2016).

17. Шумков А.А., Абляз Т.Р. Экспериментальное определение деформаций поверхностей литьевых мастер-моделей при послойном синтезе фотополимерного материала // *Металлообработка*. – 2015. – № 3(87). – С. 54–57.

References

1. Jacobs P.F. *Rapid Prototyping and Manufacturing, Fundamentals of Stereolithography*. Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, 1992, p. 369.

2. Jacobs P.F. *Stereolithography & Others RP & M Technologies: From Rapid Tooling*. Dearborn: Booknews Inc., 1996. 384 p.

3. Bernhard P., Hoffmann M., Hunziker M. Advanced Testing of Stereolithography Resins. *2nd International Conference on Rapid Prototyping*, June 23-26. The University of Dayton, 1991.

4. Fuh J.Y.H., Lu L., Tan C.C., Shen Z.X., Chew S. Curing characteristics of acrylic photopolymer used in stereolithography process. *Rapid Prototyping Journal*, 1999, vol. 5, no. 1, pp. 27-34.

5. Dusel K.-H., Eschl J., Wiedemann B. Improvement or part accuracy-investigations into the basics of photopolymerisation. *Proceedings of the 5th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing*, June 4-6, Helsinki, 1996.

6. Weissman P.T., Chartoff R.P., Rodrigues S.J., Linden S.-M. Real time measurements of linear shrinkage during laser photopolymerization: implications concerning post cure shrinkage. *Proc. 4th Int. Conf. Rapid Prototyping*, June 14-17, Dayton, 1993.

7. Raju B.S., Shekar U.C., Venkateswarlu K., Drakashayani D.N. Establishment of process model for rapid prototyping technique (stereolithography) to enhance the part quality by Taguchi method. *Procedia Technology*, 2014, no. 14, pp. 380-389.

8. Zhou C., Chen Y., Waltz R.A. Optimized mask image projection for solid freeform fabrication. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2009, no. 131(6), pp. 061003-061003-8. DOI: 10.1115/1.4000334

9. Emami M.M., Barazandeh F., Yaghmaie F. Scanning-projection based stereolithography: method and structure. *Sensors and Actuators A*, 2014, vol. A 218, pp. 116-124.

10. Emami M.M., Barazandeh F., Yaghmaie F. An analytical model for scanning-projection based stereolithography. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, no. 219, pp. 17-27.

11. Hyun-Wook Kang, Jeong Hun Park, Dong-Woo Cho. A pixel based solidification model for projection based stereolithography technology. *Sensors and Actuators*, 2012, vol. A 178, pp. 223-229.

12. Limaye A., Rosen D.W. Process planning to build mask projection stereolithography parts with accurate vertical dimensions. *Proceedings of the 17th Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, 2007, pp. 159-173.

13. Ikuta K., Hirowatari K., Ogata T. Three dimensional micro integrated fluid systems (MIFS) fabricated by stereo lithography. *Proceedings of the IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'94)*, 1994, pp. 1-6.

14. Zhou C., Chen Y., Yang Z., Khoshnevis B. Digital material fabrication using mask-image-projecton-based stereolithography. *Rapid Prototyping Journal*, 2013, vol. 19, iss. 3, pp. 153-165.

15. Chiou P.Y., Ohta A.T., Wu M.C. Massively parallel manipulation of single cells and microparticles using optical images. *Journal Natural Product Letters*, 2005, vol. 436, pp. 370-372.

16. Shumkov A.A. Sozdanie master-modelei posloinym sintezom fotopolimera [Creating a master-models stratified synthesis of photopolymer]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*, 2015, no. 2(58), available at: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=20538> (accessed 20 January 2016).

17. Shumkov A.A., Abliaz T.R. Eksperimental'noe opredelenie deformatsii poverkhnosti lit'evykh master-modelei pri posloinom sinteze fotopolimernogo materiala [Experimental determination of deformations of surfaces of molded master-models in layered synthesis of photopolymer material]. *Metalloobrabotka*, 2015, no. 3(87), pp. 54-57.

Получено 31.01.2016

Об авторах

Шумков Алексей Александрович (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: Shumkov_89@mail.ru.

Абляз Тимур Ризович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru.

Матыгуллина Елена Вячеславовна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: matik68@rambler.ru.

Килина Полина Николаевна (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры «Материалы, технологии и конструирование машин» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: sunshine0420@mail.ru.

About the authors

Aleksei A. Shumkov (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department “Materials, Technology and Constructions of Machines”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: Shumkov_89@mail.ru.

Timur R. Abliaz (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department “Materials, Technology and Constructions of Machines”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: lowrider11-13-11@mail.ru.

Elena V. Matygullina (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department “Materials, Technology and Constructions of Machines”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: matik68@rambler.ru.

Polina N. Kilina (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department “Materials, Technology and Constructions of Machines”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: sunshine0420@mail.ru.